

# ПРОБЛЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ В СИСТЕМАХ SHM: ОЦІНЮВАННЯ, ПРОГНОЗУВАННЯ, БАГАТОКЛАСОВЕ РОЗПІЗНАВАННЯ

Н.І. Бурау, С.О. Цибульник, С.С. Рупіч

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

**Abstract.** The work is devoted to the solution of the problems of intellectualization of multi-channel monitoring systems of complex spatial objects. The results of researches are given for the following problems: a) visualization of measurement data and prognostication; b) multi-class recognition by a neural network classifier, and c) development of evaluation algorithms on the basis of the maximum likelihood method.

## Вступ

Основним експлуатаційним фактором безпечного функціонування складних просторових об'єктів авіаційної техніки, нафтогазової галузі, інженерних споруд спеціального призначення є діагностика пошкоджень з метою визначення поточного функціонального стану об'єктів. Для діагностики використовують методи неруйнівного контролю та технічної діагностики, які є найбільш прийнятними для конкретного типу об'єктів, умов і режимів їх функціонування, та забезпечують необхідні показники чутливості, швидкодії, достовірності контролю. Традиційно вдосконалення таких методів та засобів проводиться з метою покращення зазначених показників при виявленні пошкоджень. Але для багатьох складних просторових об'єктів, що експлуатуються в критичних умовах та характеризуються максимально жорсткими вимогами щодо забезпечення їх безаварійної експлуатації, важливим є попередження появи пошкоджень, які можуть призвести до руйнування елементів конструкції. Для таких об'єктів все більшого поширення набувають комплексні системи моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring (SHM) [1,2].

Однією з важливих відмінностей систем SHM є впровадження сучасних комп'ютерно-інтегрованих технологій та інтелектуалізація практично всіх етапів моніторингу. Підґрунтям для створення вискоєфективних комп'ютерно-інтегрованих систем, що моделюють творчі можливості людини і отримали назву «інтелектуальних», став розвиток таких розділів штучного інтелекту, як: інженерного знання; комп'ютерної логіки та лінгвістики; когнітивної психології; методів та моделей навчання; методів пошуку та прийняття рішень. Впровадження таких технологій при розробці нових об'єктів авіаційної техніки, машинобудування, енергетики, нафтогазової галузі, інженерних споруд спеціального призначення надають можливість створювати «інтелектуальні конструкції».

Сучасний підхід організації інтелектуальних систем моніторингу передбачає розподіл функцій на декілька підсистем або окремих систем, які в загальному процесі моніторингу є його відповідними рівнями, мають свій клас вирішуваних завдань, своє алгоритмічне та програмне забезпечення. Метою даної роботи є узагальнення деяких результатів, отриманих авторами при вирішенні завдань інтелектуалізації систем моніторингу складних просторових об'єктів.

## Візуалізація даних вимірювання та прогнозування

Для вдосконалення системи функціональної діагностики та моніторингу технічного стану резервуарів з еколого-небезпечними речовинами, що експлуатуються у ажкодоступних місцях в умовах комплексного впливу навантажень, в [3,4] запропоновано, обґрунтовано та розроблено підсистему візуалізації на основі моніторингових моделей об'єкта для відображення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану, просторового положення та вібраційного стану. Підсистему візуалізації розроблено на основі технології захвату руху, як основи для відображення поточного технічного стану об'єкта у

вигляді 3D-анімації. Розроблена підсистема забезпечує: реалізацію та керування геометричною моделлю об'єкта; імітацію взаємодії елементів конструкції об'єкта; обробку та перетворення вихідних даних з датчиків, їх введення в імітаційну модель об'єкта; проведення імітаційного моделювання та відображення результатів на моделі об'єкта. Як приклад на рис. 1 наведено фото паливного резервуара на українській антарктичній станції Академік Вернадський, його розроблена тривимірна модель та головне вікно програми для візуалізації результатів комплексних вимірювань напружень та просторового положення об'єкта (виміряних кутів нахилу відносно вертикальної осі).

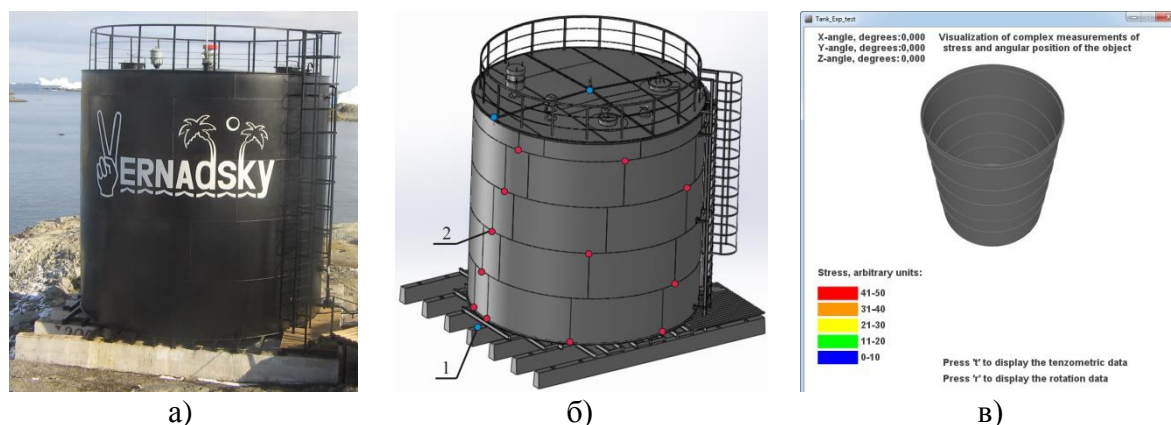


Рис. 1. Фото резервуару (а), його тривимірна модель (б) зі схемою встановлення датчиків (1 – акселерометри та інклінометри; 2 – тензометричні датчики), головне вікно програми візуалізації поточного просторового положення та даних тензометричних вимірювань (в)

Програмне забезпечення реалізовано на основі мови програмування Processing. Для напружень обрано п'ять проміжків візуалізації даних, для кожного виділено свій колір відображення даних на геометричній моделі об'єкта. Програма є універсальною, в залежності від реальних даних програмний код можна змінити або розширити для більш точної відповідності задачам, які вирішуються.

В підсистемі візуалізації реалізовано програми для прогнозування росту рівня деформації й виведення графіків у вигляді екстрапольованих ліній тренду (рис.2).

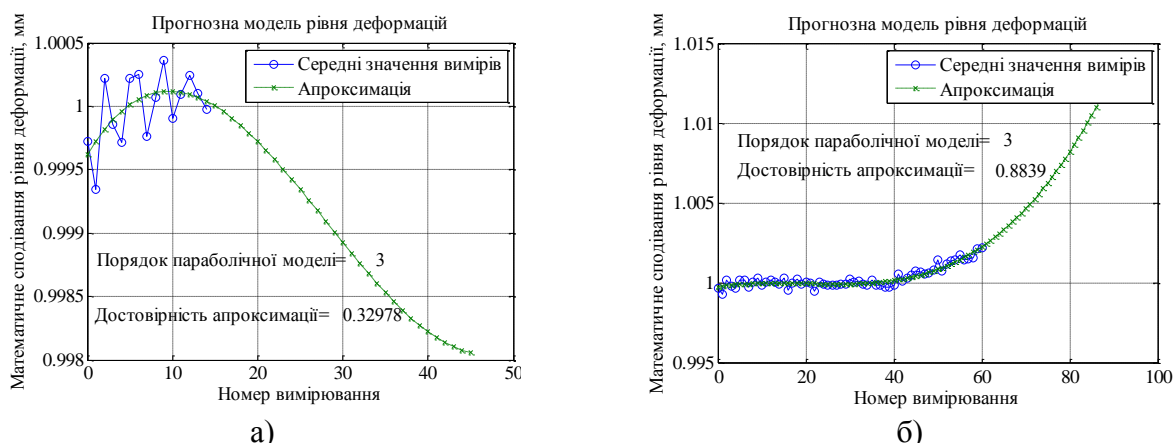


Рис. 2. Приклад екстраполяції тренду для: а) 15 вимірювань; б) 61 вимірювання

Розроблено методику, за якою тренд визначається за середніми значеннями моделі сигналів деформації за допомогою методу найменших квадратів з використанням параболічних моделей до третього порядку включно. Дослідження показали можливість підвищення точності прогнозу при збільшенні кількості вихідних даних, а достовірності

апроксимації – за рахунок наявності певної функціональної залежності між зміною середнього рівня деформацій.

### Багатокласове розпізнавання

Складні просторові об'єкти енергетики, нафтогазової галузі, авіаційної техніки за звичай характеризуються великою розмірністю, нестационарністю процесів, розподіленістю параметрів, нелінійністю, неповнотою контролю зовнішніх впливів, умов і режимів функціонування. В таких умовах є висока ймовірність появи та розвитку багатоосередкового пошкодження в місцях зварних з'єднань (заклепкових – для авіаційних конструкцій), що обумовлює багатокласовість технічних станів об'єктів як у просторовому, так і у часовому вимірах. Для розпізнавання стану об'єкта (зварного паливного резервуару) в [5] запропоновано та обґрунтовано розробку нейромережевого класифікатора, що входить до складу багатоканальної системи моніторингу. В результаті аналізу діагностичної інформації формуються вхідні багатовимірні вектори діагностичних ознак. Класифікатор відносить об'єкт до одного з визначених класів функціонального стану, які розділяються за наявністю, розмірністю та локалізацією пошкоджуваності.

Для побудови класифікатора використано імовірнісну нейронну мережу (ІНМ). Вона складається з двох шарів. Нейрони першого шару мають радіально-базисні функції активації, а другий шар нейронів є шаром конкуренції, який підраховує ймовірність приналежності вхідного вектору тому чи іншому класу, а в кінці зіставляє вектор з тим класом, ймовірність приналежності до якого вище. Елементами класифікатора є: навчальна множина образів або діагностичних ознак (вектор  $P$ ); множина цільових класів (вектор  $T$ ); матриця зв'язності  $Tc$ , яка встановлює приналежність вхідних векторів до відповідних класів; нейронна мережа, яка виконує процес класифікації та розпізнавання технічного стану елементів конструкції; тестова множина (вектор  $P_{test}$ ). Остання під час функціонування замінюється на множину реальних даних, що поступають з масиву чутливих елементів. Кожному вхідному вектору ІНМ відповідає певне вихідне або цільове значення, а для масивів вхідних та вихідних значень формується вектор приналежності вхід / ціль. Навчальна множина містить  $Q$  пар векторів вхід/ціль. Існує  $K$  класів, до яких може належати вхідний вектор. У результаті може бути утворена матриця зв'язності  $Tc$  розміром  $K \times Q$ , яка складається з нулів та одиниць. Рядки цієї матриці відповідають класам приналежності, а стовпці – векторам входу. Таким чином, якщо елемент  $Tc(i, j)$  матриці зв'язності дорівнює 1, то це означає, що  $j$ -й вхідний вектор належить до класу  $i$ .

Кількість нейронів першого шару формується по кількості пар векторів вхід/ціль навчальної множини. Вихідний шар конкуренції містить  $K$  нейронів, відповідно до  $K$  класів. Для вектору, що містить, наприклад, 5 ознак, стан об'єкту контролю описується 6 класами. Загальна схема такого класифікатора зображена на рис. 3.

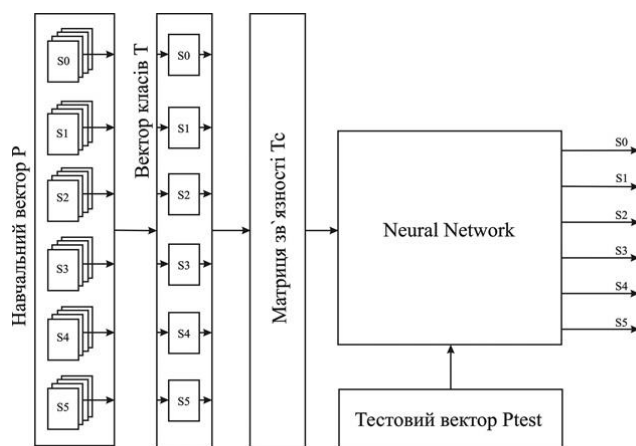


Рис.3. Загальна схема нейромережевого класифікатора

Параметр впливу ІНМ *spread* пов'язаний із середнім квадратичним відхиленням функції Гауса, що задає ширину функцій активації нейронів першого шару та визначає їхній

вплив на оцінку сумарної щільності ймовірності. Цей параметр впливає на результат класифікації, тому його оптимальне значення визначається експериментально під час тестування мережі та в процесі класифікації тестових векторів, як таке, що забезпечує безпомилкове розпізнавання чи з мінімально можливими похибками.

### Оцінювання параметрів змінювання технічного стану

Визначити поточний стан об'єкта можна за значеннями параметрів, які характеризують його змінювання і впливають на визначені діагностичні ознаки. Встановлення функціональної залежності діагностичних ознак від параметрів, що характеризують змінювання технічного стану є прямою задачею діагностики. Оцінювання параметрів технічного стану за визначеними у процесі діагностування ознаками є оберненою задачею, яку можна вирішити на основі, наприклад, методу максимальної правдоподібності (МП), якщо оцінюваний параметр є невідомою невинуватою величиною [6]. Рівняння МП для загального випадку  $n$  вимірювань можна записати у вигляді:

$$\frac{1}{\sigma_r^2} \left( n m_r \frac{\partial m_r}{\partial \vartheta} - \sum_{i=1}^n \xi_{ir} \frac{\partial m_r}{\partial \vartheta} \right) = 0,$$

де  $\xi_{ir}$  – випадкове значення  $r$ -тої ознаки при  $i$ -тому вимірюванні;  $m_r$  та  $\sigma_r$  – відповідно математичне сподівання та середнє квадратичне відхилення  $r$ -тої ознаки;  $\vartheta$  – параметр, що оцінюється.

Якщо, наприклад, математичні сподівання ознак апроксимуються поліномом першого порядку від параметра  $\vartheta$ , то оцінка МП за  $r$ -тою ознакою  $\hat{\vartheta}_r$  визначається за виразом

$$\hat{\vartheta}_r = \left( \sum_{i=1}^n \xi_{ir} - \mu_{r0} \right) / \mu_{r1}, \text{ де } \mu_{r0} \text{ та } \mu_{r1} - \text{значення коефіцієнтів поліному. Для багатовимірних}$$

векторів діагностичних ознак можна отримати відповідні вектори оцінок, за якими визначаються математичні сподівання та дисперсія оцінки параметра  $\vartheta$  в  $i$ -тому вимірюванні.

### Висновки

Результати проведених досліджень показали ефективність розроблених засобів інтелектуалізації багатоканальних систем моніторингу складних просторових об'єктів, зокрема при вирішенні таких завдань багатокласової діагностики, як візуалізація вимірювань, оцінювання та прогнозування стану об'єктів, багатокласове розпізнавання.

### Література

1. Speckmann H. Structural Health Monitoring: a contribution to the intelligent aircraft structure. [Електронний ресурс] / H. Speckmann, H. Roesner // Proc. 9th European NDT Confer. (ECNDT), 25-29 Sept., 2006, Berlin, Germany. – Режим доступу: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.1.pdf>.
2. Nagarajaiah, S. Structural monitoring and identification of civil infrastructure in the United States [Text] / S. Nagarajaiah, K. Erazo // Structural Monitoring and Maintenance. – 2016. – Vol. 3. – N. 1. – P. 51–69.
3. Цибульник С.А. Концепция визуализации данных в информационно-диагностических комплексах / Н.И. Бурау, С.А. Цибульник // Вісник інженерної академії України. – Київ, 2015. – №1. – С. 96-99.
4. Цибульник С.О. Вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів на основі імітаційного моделювання: автореф. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / С. О. Цибульник. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 27 с.
5. Синтез нейронної мережі для багатокласової діагностики елементів конструкції в експлуатації / Н. І. Бурау, А. Г. Протасов, П. С. Мироненко, С. С. Рупіч // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ – 2015. – № 2 (35). – С. 83–93.
6. Bouraou N. The non-destructive evaluation of the crack-like damage parameter of blades at the vibroacoustical diagnosis of the gas-turbine engines/ N. Bouraou, S. Ignatovich// Vibrations in Physical Systems. – 2012. – Vol.25. – P. 83-88.